

การกำจัดสารอินทรีย์อันตรายในน้ำปนเปื้อนโดยใช้หินยางธรรมชาติ

Removal of Hazardous Organic Compounds in Contaminated Water

Using Natural Rubber Chips

ภาณุ ด่านวานิชกุล*, สวลี เจริญการ, พงษ์ จำปาทิ และ ดวงกมล ด่านวานิชกุล

Panu Danwanichakul*, Savalee Jaroenkarn, Pore Jumpathi and Duangkamol Danwanichakul

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ อ.คลองหลวง ปทุมธานี 12121

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการนำหินยางธรรมชาติที่ไม่มีสารตัวเติมและที่มีสารตัวเติมต่างชนิดกันคือเขม่าดำ (เอ็น-330) และหินปูนโดยใช้ปริมาณเท่ากันในการดูดซับสารอินทรีย์หลายชนิด ได้แก่ โทลูอิน เอ็ม-ไซลีน พี-ครีซอล และฟีนอล ออกจากน้ำ โดยทดสอบการดูดซับสารอินทรีย์ออกจากน้ำที่ปนเปื้อนที่ความเข้มข้นต่างๆ คือ ประมาณ 100 200 500 และ 1000 ppm ในระบบปิดที่สัมผัสอากาศพบว่าหินยางสามารถดูดซับโทลูอินและเอ็ม-ไซลีนได้ใกล้เคียงกัน และมากกว่าพี-ครีซอลและฟีนอล ตามลำดับ และพบว่าสำหรับเพียงโทลูอินเท่านั้นที่พบว่าหินยางที่เติมเขม่าดำดูดซับได้น้อยกว่าอีกสองชนิด ส่วนสารชนิดอื่นไม่พบความแตกต่างระหว่างยางที่มีสารตัวเติมและไม่มีสารตัวเติมในช่วงความเข้มข้นที่ศึกษา นอกจากนี้เมื่อทดสอบการดูดซับในหอดูดซับขนาดเล็กซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 2.5 ซม. และความสูงประมาณ 22.5 ซม. ภายในบรรจุกรวดและหินยางที่มีส่วนผสมของเขม่าดำและใช้อัตราการไหลของสารละลายประมาณ 1.3 มล./นาที โดยใช้สารละลายเริ่มต้นเข้มข้นประมาณ 500 ppm ผลการทดสอบพบว่าผลสอดคล้องกับการทดลองการดูดซับแบบกะนั้นคือยางสามารถบำบัดน้ำปนเปื้อนโทลูอินและเอ็ม-ไซลีน ซึ่งเป็นสารที่ไม่มีขั้วเช่นเดียวกับยางได้ดีกว่าพี-ครีซอลและฟีนอล ซึ่งเป็นสารมีขั้ว ผลจากการศึกษาบ่งชี้ว่า ยางมีประสิทธิภาพในการดูดซับสารอินทรีย์ชนิดดังกล่าวที่ปนเปื้อนในน้ำได้ จึงน่าจะนำไปใช้ประโยชน์เป็นตัวดูดซับสารอินทรีย์ที่ไม่มีขั้วได้ดี

คำสำคัญ : ยางธรรมชาติ โทลูอิน เอ็ม-ไซลีน พี-ครีซอล ฟีนอล การดูดซับ

Abstract

In this work, utilization of natural rubber in treatment of water contaminated with organic compounds, which are toluene, m-xylene, p-cresol and phenol, was investigated by using rubber chips whose compositions are different, including one without any filler, one with carbon black (N-330), and one with calcium carbonate. The batch sorption tests were conducted to remove organic substances from artificially contaminated water with varying concentration of about 100, 200, 500, and 1000 ppm. It was found that for each rubber composition, toluene was adsorbed with the highest quantity, which was close to that of m-xylene but was much greater than those of p-cresol and phenol. Considering composition of rubber chips, it was found that carbon black-filled rubber adsorbed toluene the least while for other compounds, filled and unfilled rubbers were not different in sorption ability in the range of concentrations studied. In addition, the dynamic adsorption was tested by a mini-column with a diameter of about 2.5 cm and a height of about 22.5 cm packed with gravel and carbon black-filled rubber chips. The solution with concentration of about 500 ppm was pumped through the column with a flow rate of 1.3 ml/min for 12 hrs. The efficiency was calculated from the difference of the final concentration of effluent and the initial concentration. The chips could treat toluene and m-xylene, which is hydrophobic substances like rubber, better than p-cresol and phenol, which is hydrophilic. This shows that

rubber chips have a potential to be used as sorption media in treatment of water contaminated with non-polar organic substances.

Keywords : Natural Rubber, toluene, m-xylene, p-cresol, phenol, sorption

1. บทนำ

การปนเปื้อนของสารอินทรีย์ซึ่งใช้เป็นตัวทำละลายในกระบวนการผลิตต่างๆ ไม่ว่าจะเป็น เบนซีน (Benzene) โทลูอีน (Toluene) เอธิลเบนซีน (Ethyl benzene) และไซลีน (Xylene) หรือที่เรียกรวมว่า BTEX ในแหล่งน้ำธรรมชาติ เช่นน้ำใต้ดิน เกิดขึ้นได้โดยง่ายจากการทรุดของอินทรีย์บนผิวดินในขณะขนถ่ายไปยังที่ต่างๆ หลังกระบวนการผลิตรวมถึงการรั่วไหลออกจากถังเก็บหรือท่อที่ใช้ในการขนส่งเป็นระยะทางไกล [1] ถึงแม้สารเหล่านี้สามารถระเหยสู่บรรยากาศได้ แต่จะมีบางส่วนที่ยังเหลือปนเปื้อนในดินและในที่สุดก็จะไปสู่แหล่งน้ำ สารปนเปื้อนส่วนหนึ่งจะระเหยกลายเป็นไอในช่องว่างของเม็ดดิน อีกส่วนจะรวมปนอยู่กับน้ำและจะเคลื่อนที่ไปตามน้ำโดยกระแสการไหลของน้ำและ โดยการแพร่กระจายของสารในน้ำ เมื่อกอนใช้น้ำที่ปนเปื้อนดังกล่าวในการอุปโภคบริโภคก็จะได้รับอันตรายจากสารอินทรีย์เหล่านี้ ดังนั้น จึงจำเป็นต้องมีวิธีการกำจัดสารปนเปื้อนออกจากน้ำ

วิธีการกำจัดสารปนเปื้อนในน้ำใต้ดินมีหลายวิธี เช่น Pump and Treat โดยการเจาะดินลงไปแล้วสูบน้ำใต้ดินบริเวณที่มีการปนเปื้อนขึ้นมาบำบัดด้วยวิธีต่างๆ เช่น การดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ เป็นต้น อีกวิธีหนึ่งเป็นการใช้ Permeable Reactive Barriers (PRB) คือ สร้างกำแพงลงไปในพื้นที่น้ำใต้ดินเพื่อขวางการไหลของน้ำใต้ดินที่มีการปนเปื้อน ตัวกำแพงจะบรรจุวัสดุที่สามารถบำบัดสารปนเปื้อนในน้ำใต้ดินได้

ที่ผ่านมามีรายงานการนำยางล้อรถยนต์ใช้แล้วซึ่งผ่านการบดเป็นยางผงมาดูดซับสารอินทรีย์เหล่านี้เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการนำใช้เป็นตัวดูดซับโดยปกติและในลักษณะที่เป็น PRB [2-5] และมีงานวิจัยที่ใช้ชั้นยางจากยางล้อใช้แล้วในการดูดซับปรอทจากดินที่ปนเปื้อนสารอินทรีย์ได้ [6]

โดยทั่วไปในการผลิตยางล้อรถยนต์ซึ่งมีส่วนผสมของยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์หรือผลิตภัณฑ์อื่นจากยาง

ธรรมชาติจะมีการทำให้โครงสร้างแข็งแรงขึ้นเพื่อทนทานต่อน้ำมันด้วยการทำปฏิกิริยาเกิดโครงสร้างร่างแห (crosslink network) ขึ้น รวมถึงการเติมสารตัวเติมเสริมแรงเพื่อช่วยให้โครงสร้างแข็งแรงยิ่งขึ้นไปอีก ในการทดลองหาปริมาณการเชื่อมโยงของโครงสร้างร่างแหและแรงดึงดูดของสารตัวเติมในโครงสร้างของยางที่ขึ้นรูปแล้วนั้นจะอาศัยสารเคมีที่ทำให้ยางบวมตัวได้ นั่นก็คือโทลูอีน ดังนั้น จึงเป็นเหตุผลที่มีผู้สนใจนำยางใช้แล้วมาผลิตเป็นตัวดูดซับสารจำพวกนี้ต่อไปโดยไม่ได้ผ่านการทำเป็นถ่านกัมมันต์ก่อน แต่อาจมีการแปรสภาพไปเป็นยางบด (Ground Rubber) หรือคัตย่อยๆ เป็นชิ้นขนาดเล็กลง (Rubber Chip) แล้วนำไปใช้เป็นส่วนผสมในการสร้างกำแพงกั้นลงไปใต้ดิน (Permeable Reactive Barrier) เพื่อกั้นการไหลของน้ำใต้ดินให้ไหลผ่านกำแพงก่อน สารที่อยู่ในกำแพงจะดูดซับสารที่ปนเปื้อนมากับน้ำใต้ดิน

รายงานวิจัยหนึ่งได้ทดสอบการดูดซับเนฟทาลีน (Naphthalene) โทลูอีนและปรอทซึ่งเป็นโลหะหนักโดยใช้ยางบดด้วยวิธีการดูดซับในแบบกะ (Batch Test) [7] พบว่าการดูดซับสารอินทรีย์ใช้เวลาไม่นานนัก ในขณะที่การดูดซับปรอทใช้เวลานานกว่าจะเข้าสู่จุดสมดุล และยางดูดซับเนฟทาลีนได้ดีกว่าโทลูอีน และในอีกงานวิจัยหนึ่งซึ่งทดสอบทั้งในแบบกะและแบบหอดูดซับ (Column Test) โดยใช้ยางบดในการดูดซับเบนซีนและโอ-ไซลีน (o-Xylene) [5] พบว่ายางสามารถดูดซับโอ-ไซลีนได้ดีกว่าเบนซีนถึงแม้ว่าขนาดโมเลกุลของเบนซีนจะเล็กกว่าก็ตาม แต่โอ-ไซลีนมีความไม่ชอบน้ำมากกว่า (hydrophobicity) จึงเข้าไปอยู่ภายในเนื้อยางได้ดีกว่าเบนซีน การทดลองดังกล่าวผู้วิจัยได้ใช้ระบบที่มีเพียงเฟสน้ำและเฟสของยางบด โดยให้มีเฟสอากาศน้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้เพื่อลดผลของการระเหยของสารเข้าไปในเฟสอากาศ ดังนั้น จึงเห็นได้ชัดเจนว่าการแยกสารออกจากน้ำขึ้นอยู่กับความไม่ชอบน้ำของสารนั้นๆ ในอีกงานวิจัยหนึ่งซึ่งใช้ยางบดเช่นกันในการดูดซับสารหลายชนิด [4] พบว่ายางสามารถดูดซับเอ็ม-ไซลีน (m-Xylene)

ได้ศึกษาเอทิลเบนซีน โทลูอิน ไตรคลอโรเอธิลีน (Trichloroethylene) 1,1,1-ไตรคลอโรเอเทน (1,1,1-Trichloro-ethane) คลอโรฟอร์ม (Chloroform) และเมทิลีนคลอไรด์ (Methylene chloride) ตามลำดับ เห็นได้จากงานวิจัยนี้อีกเช่นกันว่า ความไม่ชอบน้ำของโทลูอิน น้อยกว่าเอม-ไซลีน จึงทำให้ยางดูดซับเอม-ไซลีนได้ดีกว่า

จากงานวิจัยที่พบทวนมา พบเพียงงานเดียวเท่านั้นที่ใช้ชั้นยางใช้แล้วมาบำบัดน้ำปนเปื้อนฟีนอล (Phenol) และพี-ครีซอล (p-Cresol) ซึ่งพบว่ายางสามารถดูดซับพี-ครีซอล (p-Cresol) ได้ดีกว่าฟีนอล และ พบว่าชั้นยางขนาด 2-6 มม. ดูดซับได้ดีกว่าชั้นยางขนาด 30 มม. และยังคงรักษาคุณสมบัติเชิงกลเมื่อนำมาผสมกับกรวดในปริมาณต่างๆ กันเพื่อนำไปใช้เป็น PRB อีกด้วย [8]

สำหรับงานวิจัยนี้จะศึกษาครอบคลุมการใช้ชั้นยางมาบำบัดทั้งสารที่ชอบน้ำและไม่ชอบน้ำ ทั้งนี้การทดลองจะใช้สภาวะการทดลองเหมือนกันทั้งหมด นั่นคือเป็นการผสมกันในสามเฟส นั่นคือ เฟสน้ำ เฟสยาง และมีเฟสอากาศร่วมด้วย และยังมีการศึกษาโดยใช้หูดูดซับขนาดเล็กด้วย ทั้งนี้เพราะงานวิจัยอื่นๆ จะศึกษาเพียงสองเฟส เท่านั้น แต่ในความเป็นจริงถึงแม้จะได้ดินจะมีชีวิตในหอดูดซับ แต่ในดินก็มีช่องว่างของอากาศซึ่งสารสามารถระเหยขึ้นมาได้บางส่วน รวมถึงเป็นการอธิบายการเคลื่อนที่ของสารดังกล่าวในน้ำผิวดินซึ่งสัมผัสกับอากาศได้โดยตรง อย่างไรก็ตาม การศึกษาวิจัยนี้เป็นเพียงขั้นพื้นฐานเท่านั้น การเลียนแบบจำลองสภาวะของน้ำใต้ดินจริงๆ ยังต้องคำนึงถึงปัจจัยอื่นๆ อีกมาก เช่น ความดัน และการดูดซับของสารในเนื้อดิน การแพร่ของสารผ่านช่องว่างระหว่างดิน อุณหภูมิที่เปลี่ยนไปของน้ำใต้ดิน สารผสมต่างๆ ที่มีอยู่ในน้ำใต้ดิน และ ค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำใต้ดิน เป็นต้น

เนื่องจากในงานวิจัยก่อนหน้านี้ได้ใช้ยางเหลือใช้ซึ่งไม่ทราบส่วนผสมของสารที่ผสมภายในยาง ทั้งแบบที่เป็นชั้นและแบบผงเพื่อบำบัดน้ำปนเปื้อนสารหลายชนิด งานวิจัยนี้จึงจัดทำขึ้นเพื่อศึกษาในเบื้องต้นให้ทราบพฤติกรรมของชั้นยางธรรมชาติที่มีส่วนผสมของสารตัวเติม (Filler) ต่างกัน นั่นคือ เขม่าดำ (Carbon Black) และ หินปูน (CaCO_3) ในการดูดซับสารอินทรีย์ ได้แก่ โทลูอิน เอม-ไซ พี-ครี และ ฟีนอล ที่ปนเปื้อนในน้ำ โดยศึกษาเปรียบเทียบที่ความเข้มข้นต่างๆ กัน และใช้ยางทั้งสามสูตร การทดลองส่วนสุดท้าย

จะใช้หูดูดซับขนาดเล็กเพื่อดูประสิทธิภาพในการแยกสารปนเปื้อนออกจากน้ำที่มีการไหลของน้ำในอัตราเร็วไม่มากนัก

2. วิธีการวิจัย

2.1 การออกสูตรยาง

ในการออกสูตรยางเพื่อผลิตผลิตภัณฑ์ยางนั้นมีส่วนผสมของสารต่างๆ ดังนี้ ยางธรรมชาติชนิด STR 20 ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัทยางไทย ปักยี่ใต้ จำกัด และใช้กำมะถัน (Sulfur) ซึ่งซื้อมาจากร้านศึกษาภัณฑ์พาณิชย์เป็นสารคงรูป สารเร่งให้ยางคงรูป (Accelerator) คือ Tetramethylthiuram disulphide (TMTD) ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท เจ-เจ-เดกussa เคมีคอล (ที) จำกัด N-cyclohexylbenzothiazole-2-sulphenamide (CBS) ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัทซันนี่เวลด์ (1989) จำกัด สารกระตุ้นสารเร่ง (Activator) ได้แก่สังกะสีออกไซด์ (Zinc oxide) และกรดสเตียริก (Stearic acid) ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัทลือกซ์เลย์ จำกัด (มหาชน) สารป้องกันยางเสื่อม (Antidegradant) ใช้ N-(1,3-dimethylbutyl)-N'-Phenyl-p-phenylenediamine (6-PPD) ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัทซันนี่เวลด์ (1989) จำกัด สารตัวเติม (Filler) ในที่นี้ใช้ผงเขม่าดำ (Carbon black) ชนิด N-330 ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัทลือกซ์เลย์ จำกัด (มหาชน) และสารตัวเติมชนิดหินปูน (CaCO_3) ซื้อจากร้านศึกษาภัณฑ์พาณิชย์

เนื่องจากงานวิจัยนี้สนใจศึกษาผลของสารตัวเติมต่อสมบัติการดูดซับ ดังนั้นจึงออกสูตรยางเป็น 3 สูตร ดังแสดงในตารางที่ 1 โดยแบ่งเป็นระบบของยางธรรมชาติที่ไม่มีสารตัวเติมและยางธรรมชาติที่มีส่วนผสมของสารตัวเติมต่างชนิดกันคือเขม่าดำ และหินปูน ตามลำดับ

2.2 การบดยาง

2.2.1 การบดให้ยางนุ่ม

เนื่องจากยางธรรมชาติมีความเหนียวสูงทำให้การผสมเป็นไปได้ยาก เพราะสารเคมีจะเข้าผสมกับยางได้ยาก ดังนั้นก่อนใส่สารเคมีจึงต้องลดความเหนียวของยางโดยการบดให้ยางนุ่ม โดยใช้เครื่องบดแบบลูกกลิ้ง (Two-Roll Mill) แล้วตัดยางให้เป็นชิ้นเล็กพอที่จะเข้าเครื่องบดผสมยางในขั้นตอนต่อไปได้

ตารางที่ 1 สูตรยางที่ใช้ในการทดลอง

ชื่อสูตร/ ส่วนผสม	ยาง (R100)	เขม่าดำ (C30)	หินปูน (Ca30)
STR 20	100	100	100
Filler	0	30	30
6-PPD	3	3	3
Stearic acid	1	1	1
Zinc oxide	5	5	5
CBS	3.5	3.5	3.5
TMTD	0.5	0.5	0.5
Sulphur	0.4	0.4	0.4

หน่วยของสัดส่วนคือ phr (part per one hundred parts of rubber ซึ่งคือ ส่วนในเนื้อยางร้อยละ)

2.2.2 บดผสมยางกับสารเคมี

ใช้เครื่องบราเบนเดอร์ (Brabender) รุ่นแลบสเตชัน บดผสมยางที่ความเร็ว 40 รอบ/นาที อุณหภูมิเริ่มต้นที่ 50 °ซ. การบดผสมเริ่มจากการบดยาง 3 นาที จากนั้นใส่สารตัวเติมและบดประมาณ 3 นาที จึงเติมกรดสเตียริกและ ZnO และบดต่ออีก 2 นาที ตามด้วยการเติม 6-PPD และบดอีก 2 นาที สุดท้ายเติม CBS, TMTD และกำมะถัน บดต่อเป็นเวลา 2 นาที ยางที่ได้หลังจากหลังจากที่ผสมสารเคมีต่างๆ เรียบร้อยแล้วเรียกว่า ยางคอมพาวด์ (Rubber Compound) นำคอมพาวด์ที่ได้ไปรีดให้เป็นแผ่นด้วยเครื่องบดแบบลูกกลิ้ง

2.3 การทดสอบคุณสมบัติของยาง

ยางที่บดแล้วไปทดสอบสมบัติการทำให้ยางคงรูป โดยใช้เครื่อง Moving Die Rheometer ยี่ห้อ TECH-PRO รุ่น rheoTECH MD+ ที่มหาวิทยาลัยมหิดล ศาลายา ที่อุณหภูมิ 150 °ซ.

2.4 การขึ้นรูปยางโดยใช้แม่พิมพ์

การใช้แม่พิมพ์ขึ้นรูปยางเป็นแผ่นบางมีความหนาประมาณ 2 มม. เป็นการขึ้นรูปยางพร้อมๆ กับการเกิดปฏิกิริยาของรูป (Vulcanization) โดยอาศัยความร้อนและแรงอัด โดยใช้เครื่อง Compression Mold ที่อุณหภูมิ 150 °ซ. ใช้เวลาที่ 90% cure time แล้วนำแผ่นยางที่ได้มาตัดเป็นชิ้นเล็กๆ (Rubber chip) ขนาด 1.0x1.0x0.2 ซม. เพื่อนำไปศึกษาการดูดซับสารในขั้นตอนต่อไป

2.5 การทดสอบสมบัติการดูดซับ (Sorption)

2.5.1. เตรียมสารละลายโทลูอีน เอ็ม-ไซลีน พี-ครีซอล และฟีนอลที่ความเข้มข้นประมาณ 100, 200, 500 และ 1,000 ppm แล้วจึงเติมสาร โซเดียมเอไซด์ (Sodium azide) ปริมาณ 0.5 กรัม ลงในสารละลายที่เตรียมไว้เพื่อป้องกันไม่ ให้สารถูกย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ เขย่าสารละลายให้เข้ากัน แบ่งสารละลายเทลงในขวดรูปชมพู่จำนวน 3 ขวด ขวดละ 100 มล. ปิดปากขวดให้แน่นด้วยจุกยางที่ห่อด้วยแผ่นอลูมิเนียมบาง แล้วจึงติดเทปกาวอีกชั้นหนึ่งเพื่อป้องกันไม่ให้ สารระเหยออกไปในระหว่างการดูดซับ ซึ่งขึ้นยางของยาง ทั้ง 3 สูตร สูตรละประมาณ 5 กรัม แล้วนำไปใส่ในสารละลาย ในขวดที่เตรียมไว้ นำขวดรูปชมพู่ทั้ง 12 ขวดเข้าเครื่องเขย่า เพื่อให้การผสมสารเข้ากันและเพื่อเร่งให้การดูดซับสารละลาย ของตัวทำละลายอินทรีย์ของขึ้นยาง ให้ถึงจุดสมดุลเร็วขึ้น โดยใช้ความเร็วในการเขย่าที่ 60 รอบต่อนาทีและที่อุณหภูมิ 30°ซ. เป็นเวลา 7 วัน แล้วเก็บสารละลายในขวดรูปชมพู่ทั้ง 12 ขวดเพื่อนำไปตรวจวัดความเข้มข้นที่เหลือของสารอินทรีย์ในสารละลายโดยใช้เครื่อง Gas Chromatography ที่มี headspace

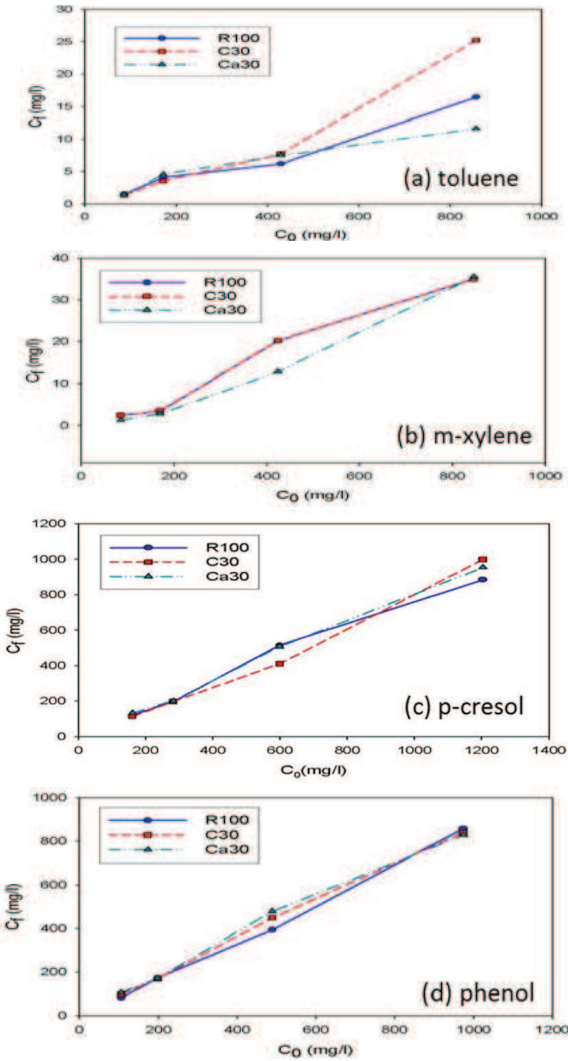
2.6 การดูดซับโดยใช้หลอดดูดซับขนาดเล็ก (Mini-Column)

เตรียมหลอดดูดซับสาร โดยใช้คอลัมน์แก้วที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 2.6 ซม. และสูง 22.5 ซม. ในหลอด บรรจุขึ้นยางปริมาณ 25 กรัม ผสมกับกรวด บรรจุจนถึงระดับทางออก ตรวจสอบปริมาตรช่องว่าง (Void) ด้วยการเติมน้ำจนเต็มก่อนทำการทดลองการดูดซับ เตรียมสารละลาย ที่ความเข้มข้นประมาณ 500 ppm ในภาชนะขนาด 2000 มล. ใส่โซเดียมเอไซด์ปริมาณ 1 กรัม ลงในสารละลายที่เตรียมไว้ เขย่าให้เข้ากัน บีบสารละลายเข้าสู่หลอดดูดซับด้วย อัตรา 1.3 มล./นาที จับเวลาการไหลและเก็บตัวอย่างทุกหนึ่ง ชั่วโมง ครั้งละ 5 มล. เพื่อวัดความเข้มข้นของสารละลาย ที่ทางออก นำตัวอย่างทั้งหมด 13 ตัวอย่างไปตรวจวัดความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในสารละลายโดยใช้เครื่อง Gas Chromatography ที่มี headspace

3. ผลการวิจัยและอภิปรายผล

3.1 ผลของสารตัวเติมต่อการดูดซับสารอินทรีย์

ผลการทดลองการดูดซับสารอินทรีย์ในน้ำโดยใช้ขึ้นยางที่ไม่มีสารตัวเติมเปรียบเทียบกับขึ้นยางที่มีสารตัวเติม



รูปที่ 1 ความเข้มข้นของสารอินทรีย์หลังการดูดซับ

แสดงในรูปที่ 1 เมื่อพิจารณาจากความเข้มข้นของสารที่เหลืออยู่ในน้ำ (C) พบว่าขงที่มีสารตัวเดิมจำพวกปูนขาว จะดูดซับโทลูอินและเอ็ม-ไซลีน ซึ่งเป็นสารที่ไม่มีขั้วได้ดีกว่าขงที่ไม่มีสารตัวเดิมและขงที่เติมด้วยผงเขม่าดำ ปูนขาวน่าจะมีความเป็นรูพรุนที่สามารถดูดซับสารดังกล่าวไว้ที่ผิวของอนุภาคได้ ส่วนการเติมผงเขม่าดำทำให้โครงสร้างของขงแข็งแรงขึ้นด้วยแรงดึงดูดระหว่างคาร์บอนของเขม่าดำกับคาร์บอนในโมเลกุลของขง ดังในงานวิจัยก่อนหน้านี้ [9] ซึ่งพบว่าหากนำขงที่มีผงเขม่าดำไปแช่โทลูอิน บริสทุธิ์หรือเอ็ม-ไซลีนบริสทุธิ์ จะทำให้ขงเกิดการบวมตัวได้ช้าลงและน้อยลง ยังผลให้ดูดซึมสารทั้งสองได้น้อยกว่าขงที่เติมด้วยปูนขาว และงานวิจัยซึ่งเผยแพร่เมื่อไม่นานมา

นี้พบว่า การเติมขงธรรมชาติด้วยผงเปลือกหอยทาก [10] และผงเปลือกถั่วลิสง [11] ทำให้โครงสร้างของขงแข็งแรงขึ้น จึงดูดซึมโทลูอินและไซลีนได้น้อยลง

อย่างไรก็ตาม เนื่องจากความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในน้ำในงานวิจัยนี้น้อยมากเมื่อเทียบกับปริมาณสารอินทรีย์บริสทุธิ์ที่สามารถดูดซับได้ในขงจนอิ่มตัว (แต่ก็มากพอในระดับที่ก่อให้เกิดอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต) จึงไม่สามารถสังเกตเห็นผลของการบวมตัวดังกล่าวได้ สำหรับสารพี-ครีซอล และฟีนอลซึ่งเป็นสารอินทรีย์ที่มีขั้วจึงเป็นสารที่ชอบน้ำ จึงถูกดูดซับด้วยขงซึ่งเป็นสารไม่มีขั้วได้น้อยกว่าโทลูอินและ เอ็ม-ไซลีนอย่างเห็นได้ชัด และไม่สามารถสังเกตเห็นผลของสารตัวเดิมต่อการดูดซับทั้งสองนี้

3.2 ผลความสามารถในการดูดซับสารอินทรีย์ในน้ำของขงในระบดูดซับแบบกะ

ในการเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับของขงจึงได้นำผลของขงที่มีสารตัวเดิมต่างกันมาเฉลี่ยรวมกัน ทั้งนี้ในการคำนวณความสามารถในการดูดซับจะพิจารณาผลการดูดซับที่สภาวะสมดุล ซึ่งเป็นสมดุลของความเข้มข้นของสารที่เหลืออยู่ในเฟสน้ำ (C_{eq}) และปริมาณของสารในขง (Q_{ad}) ซึ่งคำนวณได้จากสมมูลมวลสารดังนี้

$$Q_{ad} = V(C_0 - C_{eq}) / m \quad (1)$$

เมื่อ C_0 คือความเข้มข้นของสารเมื่อเริ่มต้น V คือปริมาตรของสารละลายและ m คือมวลของขงที่ใช้ในการดูดซับ และเนื่องจากขงของสารละลายไม่ได้บรรจุสารจนเต็มจึงมีเนื้อที่เหลืออยู่ประมาณ 10 มล. จึงทำให้โทลูอินและเอ็ม-ไซลีนซึ่งเป็นสารระเหยได้ง่าย ระเหยออกมา ยังผลให้ความเข้มข้นของสารเริ่มต้นก่อนการดูดซับนั้นมีปริมาณลดลงจากที่ตรวจได้ เพื่อให้ผลถูกต้องยิ่งขึ้น จึงได้คำนวณปริมาณสารโทลูอินและเอ็ม-ไซลีนที่ระเหยโดยใช้กฎของเฮนรี (Henry's Law) ดังแสดงด้วยสมการที่ 2 โดยใช้ค่าคงที่ของเฮนรีที่อุณหภูมิ 25 °ซ. เท่ากับ 6.352×10^{-3} , 6.778×10^{-3} , 7.596×10^{-7} , 4.524×10^{-7} atm·m³/mol สำหรับโทลูอิน เอ็ม-ไซลีน พี-ครีซอล และฟีนอลตามลำดับ

$$P_i = H C_i \quad (2)$$

เมื่อ P_i และ C_i คือความดันย่อยและความเข้มข้นของ

สาร i ในน้ำตามลำดับ และ H คือค่าคงที่ของเฮนรี (Henry's constant) เมื่อทราบค่าความดันย่อยในอากาศจึงสามารถประมาณสารที่ระเหยอยู่ในอากาศได้ สำหรับพี-ครีซอลและฟีนอล ค่าที่คำนวณได้มีค่าน้อยมาก จึงสมมติได้ว่าไม่มีการระเหยของทั้งสองสารในช่องว่างในขวด หลังจากที่ทำปริมาณสารที่ระเหยไปสู่เฟสของอากาศแล้ว จึงสามารถหาความเข้มข้นที่เหลืออยู่ในสารละลายได้ ซึ่งหลังจากที่ผ่านการทดลองแล้วปริมาณสารส่วนหนึ่งจะเข้าไปอยู่ในยาง ส่วนที่เหลือสุดท้ายก็ยังคงอยู่ในสารละลายซึ่งก็คือ ความเข้มข้นที่ได้จากการตรวจด้วยวิธีก๊าซโครมาโตกราฟีนั่นเอง

เมื่อคำนวณความสามารถในการดูดซับของชั้นยางได้แล้ว จึงนำมาสร้างไอโซเทอมของการดูดซับ โดยพิจารณาจากแบบจำลองของฟรอนด์ลิช (Frundlich isotherm) ตามสมการที่ 3

$$Q_{ad} = K_F C_{eq}^{1/n} \quad (3)$$

เมื่อ Q_{ad} และ C_{eq} มีนิยามตามที่ได้กล่าวข้างต้น ส่วน K_F และ n เป็นพารามิเตอร์ของสมการฟรอนด์ลิช สมการที่ 3 สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของความสัมพันธ์เชิงเส้นได้ดังนี้

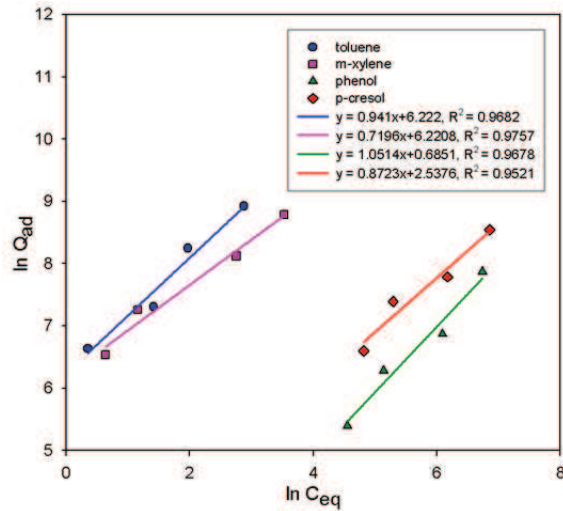
$$\ln(Q_{ad}) = (1/n) \ln(C_{eq}) + \ln K_F \quad (4)$$

ความสัมพันธ์ดังกล่าวแสดงในรูปที่ 2 จากความสัมพันธ์เชิงเส้นในสมการที่ (4) ทำให้สามารถคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของสารอินทรีย์เหล่านี้เมื่อถูกดูดซับด้วยชั้นยาง ได้ดังแสดงในตารางที่ 2

เมื่อพิจารณาจากค่า K_F พบว่าโทลูอินและเอ็ม-ไซลีนมีค่า K_F ใกล้เคียงกันมาก และมากกว่าพี-ครีซอล และฟีนอลอย่างมาก ซึ่งแสดงถึงความสามารถในการดูดซับโทลูอินและเอ็ม-ไซลีนของยางธรรมชาติ ยางธรรมชาตินั้นเป็นสารพอลิเมอร์ซึ่งมีหน่วยย่อยคือ ไอโซพรีน (Isoprene) ดังนั้นยางจึงสามารถบวมตัวในตัวทำละลายที่เข้ากันได้ (Good Solvent) เช่นเดียวกับพอลิเมอร์อื่นๆ ความสามารถในการบวมตัวของพอลิเมอร์ขึ้นกับกระบวนการแพร่ของสารเข้าไปในเนื้อพอลิเมอร์ จึงสัมพันธ์กับความเข้ากันได้ระหว่างโมเลกุลของพอลิเมอร์กับสารละลายซึ่งเกี่ยวข้องกับความสัมพันธ์ของขั้วและไม่มีขั้วของสารนั้น ดังนั้นประโยชน์ของยางที่นำมาใช้ดูดซับสารนี้จึงคล้ายกับการนำพอลิเมอร์ชนิดต่างๆ มาทำเป็นเยื่อเลือกผ่านเพื่อแยกสารออกจากสารละลายหรือของผสม ดังตัวอย่างงานวิจัย เช่น การศึกษาการเคลื่อนที่

ตารางที่ 2 ค่าพารามิเตอร์ในสมการฟรอนด์ลิช

ชนิดสารละลาย	K_F	n
โทลูอิน	503.710	1.063
เอ็ม-ไซลีน	503.106	1.390
พี-ครีซอล	12.649	1.146
ฟีนอล	1.984	0.951



รูปที่ 2 ฟรอนด์ลิชไอโซเทอมของการดูดซับสารอินทรีย์ในน้ำด้วยชั้นยางธรรมชาติ

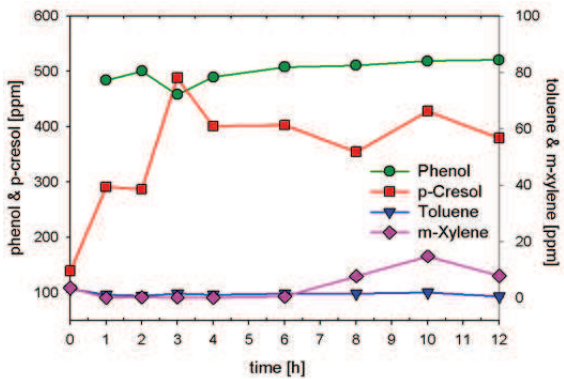
ของไฮโดรคาร์บอนที่เป็นวงแหวน ผ่านเยื่อพอลิเมอร์ของสารผสมยางธรรมชาติและพอลิสไตรีน [12] ซึ่งพบว่า การแพร่ผ่านจะยากขึ้นเมื่อมีส่วนผสมของพอลิสไตรีนมากขึ้น เนื่องจากยางขยายตัวได้ยากขึ้น คล้ายคลึงกับการเติมสารตัวเติมนั่นเอง หรือการผสมยางไนไตรล์ (Nitrile rubber) กับยางธรรมชาติก็พบเช่นกันว่า การแพร่ผ่านของสารไฮโดรคาร์บอนยากขึ้นเมื่อมีส่วนผสมของยางไนไตรล์เพิ่มมากขึ้น [13]

เมื่อเปรียบเทียบค่า n ของโทลูอินและเอ็ม-ไซลีน พบว่าค่า n ของเอ็ม-ไซลีนมีค่ามากกว่าโทลูอินซึ่งแสดงว่าความสามารถในการดูดซับที่ความเข้มข้นสูงจะน้อยกว่า ในขณะที่ค่า n ของพี-ครีซอลและฟีนอลมีค่าเข้าใกล้หนึ่งซึ่งอาจเรียกความสัมพันธ์นี้ว่าไอโซเทอมแบบเชิงเส้น (Linear isotherm) ดังนั้นค่า K_F ที่คำนวณได้ อาจเรียกว่าค่าการแบ่งแยกระหว่างเฟส (Partition coefficient) ซึ่งเป็นค่าแสดง ความชอบของสารที่จะแบ่งแยกไปอยู่ในเฟสทั้งสอง เช่น

โทลูอินมีค่า K_F สูงแสดงว่าชอบที่จะอยู่ในเฟสของยางมากกว่าอยู่ในเฟสของน้ำ ในการศึกษาการเคลื่อนที่ของสารในเฟสต่างๆ ในสิ่งแวดล้อม ได้มีการกำหนดค่า ซึ่งก็คือค่า Partition Coefficient ของสารระหว่างเฟสของออกทานอล (Octanol) และเฟสของน้ำ ถ้าค่า K_{OW} มีค่ามากหมายถึงสารนั้นสามารถเข้าไปในเฟสของออกทานอลซึ่งเป็นตัวแทนของเฟสที่ไม่มีขั้วหรือมีขั้วน้อย ได้ดีกว่าในเฟสของน้ำซึ่งเป็นตัวแทนของเฟสที่มีขั้วหรือมีขั้วมาก นั่นคือสารประเภทที่ไม่ชอบน้ำจะมีค่า K_{OW} มากกว่าสารประเภทที่ชอบน้ำ ดังนั้นค่าของ K_{OW} จึงมักใช้บอกความชอบน้ำหรือไม่ชอบน้ำของสารใดๆ ได้ ค่า $\log K_{OW}$ ของโทลูอิน เอ็ม-ไซลีน พี-ครีซอลและฟีนอลที่อุณหภูมิ 25 °ซ. มีค่าเท่ากับ 2.730, 3.200, 1.940 และ 1.460 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าเอ็ม-ไซลีนมีความไม่ชอบน้ำมากกว่าโทลูอินจึงน่าจะดูดซับในยางได้ดีกว่าโทลูอิน ดังในการศึกษาที่ผ่านมาซึ่งใช้ระบบที่ไร้อากาศ มีเพียงเฟสของน้ำสัมผัสกับเฟสของยางเท่านั้น [8] แต่ในงานวิจัยนี้กลับให้ผลตรงกันข้าม ทั้งนี้เนื่องจากเอ็ม-ไซลีนมีค่าคงที่ของเฮนรีสูงกว่าโทลูอิน จึงเกิดการระเหยได้มากกว่า จึงทำให้เหลือปริมาณที่ดูดซับในยางน้อยกว่านั่นเอง ดังนั้นพฤติกรรมดูดซับของสารระเหยง่ายจึงน่าจะเป็นกระบวนการที่แข่งขันกันระหว่างการระเหยของสารในอากาศกับการดูดซับสารนั้นไว้ด้วยตัวดูดซับ ซึ่งเป็นเรื่องน่าสนใจศึกษาเป็นอย่างยิ่ง

3.3 ผลการศึกษาการดูดซับสารอินทรีย์ในน้ำโดยใช้หอดูดซับขนาดเล็ก

อัตราเร็วของการไหลของสารละลายในการทดลองมีค่าประมาณ 1.3 มล./นาที และอัตราส่วนของช่องว่าง (Void fraction) ประมาณ 0.50 กราฟระหว่างค่าความเข้มข้นในหน่วย ppm กับเวลาในหน่วยชั่วโมงของสารละลายทั้ง 4 ชนิด แสดงดังรูปที่ 3 ในระบบหอดูดซับจะมีส่วนที่เป็นช่องว่างที่มีอากาศจึงทำให้โทลูอินหรือเอ็ม-ไซลีนเกิดการระเหยไปได้ในขณะที่เก็บสารตัวอย่างเพื่อนำไปวิเคราะห์ ไอของสารอาจจะหลุดรอดออกไปได้ ดังนั้นในสารละลายสุดท้ายจะมีการปรับค่าความเข้มข้นที่วัดได้ โดยรวมปริมาณสารที่ระเหยไปในแต่ละครั้งเข้าไปด้วย สำหรับการประมาณสารที่ระเหยไปในแต่ละครั้งจะถือว่าสารละลายในหอดูดซับในสภาวะสมดุลกับสารในเฟสของอากาศ ซึ่งพอจะมีความเป็น



รูปที่ 3 ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ที่ทางออกของหอดูดซับ ณ เวลาต่างๆ

ไปได้เพราะอัตราการไหลของสารละลายค่อนข้างช้า ระบบอาจปรับตัวเข้าสู่สมดุลได้เร็ว ดังนั้น การคำนวณสารที่ระเหยจะใช้สมการของเฮนรีดังที่กล่าวไว้แล้วข้างต้นนั่นเอง

เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 3 จะพบว่าสารละลายโทลูอินที่ออกมาตอนเริ่มต้น ($t = t_0$) หลังจากที่เกิดเคลื่อนที่ผ่านหอดูดซับโดยใช้เวลาประมาณ 25 นาที มีความเข้มข้นน้อยกว่า 1 ppm และมีค่าความเข้มข้นในช่วงเวลาต่างๆ ตลอดการทดลอง 12 ชั่วโมง น้อยกว่า 1 ppm เช่นเดียวกัน และจากกราฟที่ได้ทำให้ทราบว่าเวลาที่ใช้ในการทดลองน้อยเกินไปทำให้ไม่สามารถเห็นจุดที่ยางอิ่มตัวไปด้วยสารอินทรีย์ นั่นคือจุดที่ยางไม่สามารถดูดซับสารอินทรีย์ได้อีกนั่นเอง ส่วนความเข้มข้นของสารละลายเอ็ม-ไซลีนที่ออกมาตอนเริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 3.527 ppm และมีความเข้มข้นค่อนข้างต่ำตลอดการทดลอง 12 ชั่วโมงเช่นเดียวกัน แต่กราฟของเอ็ม-ไซลีนเริ่มสูงขึ้นประมาณชั่วโมงที่ 6 จากความเข้มข้นของสารละลายที่เคลื่อนที่ผ่านหอดูดซับของทั้งโทลูอินและเอ็ม-ไซลีนแสดงให้เห็นว่ายังมีประสิทธิภาพสูงในการกำจัดสารอินทรีย์ปนเปื้อนที่ไม่มีขั้ว และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างโทลูอินและเอ็ม-ไซลีนจะเห็นว่ายางดูดซับโทลูอินได้ดีกว่าเช่นเดียวกันกับผลการทดลองในส่วนก่อนหน้า

สำหรับสารละลายฟีนอลนั้น พบว่าความเข้มข้นเริ่มต้นหลังจากที่สารเคลื่อนที่ผ่านหอดูดซับมีค่าเท่ากับ 484.302 ppm หลังจากนั้นความเข้มข้นเพิ่มขึ้นตามเวลาตลอดการทดลอง แสดงให้เห็นว่ายังมีประสิทธิภาพในการดูดซับฟีนอลต่ำเมื่อใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นก่อนการทดลองที่ค่อนข้างสูงคือ 554.481 ppm ส่วนสารละลายพี-ครีซอลมีความ

ตารางที่ 3 ประสิทธิภาพของหอดูดซับ

สารละลาย	C_0 (ppm)	C_f (ppm)	ร้อยละการดูดซับ
โทลูอิน	428.377	1.990	99.54
เอ็ม-ไซลีน	423.256	5.126	98.79
พี-ครีซอล	316.120	87.179	72.42
ฟินอล	554.481	514.750	7.17

เข้มข้นเมื่อเริ่มต้น หลังจากทีสารเคลื่อนที่ผ่านหอดูดซับไปแล้วเท่ากับ 139.170 ppm จากนั้นความเข้มข้นเพิ่มขึ้นจนมีค่าใกล้เคียงกับความเข้มข้นของสารละลายตอนเริ่มต้นก่อนทำการทดลองในระยะเวลาเพียง 4 ชั่วโมง

เพื่อให้เห็นความแตกต่างของประสิทธิภาพของหอดูดซับขนาดเล็กในการดูดซับสารละลายอินทรีย์ต่างชนิดกันได้เป็นอย่างดี จึงได้เปรียบเทียบผลในรูปของความเข้มข้นเริ่มต้นก่อนการทดลอง (C_0) และความเข้มข้นสุดท้าย (C_f) ของสารละลายทั้งหมดหลังจากที่ผ่านการทดลองเป็นเวลา 12 ชั่วโมง จากนั้นนำมาคิดเป็นร้อยละการดูดซับซึ่งก็คือความเข้มข้นที่ลดลงไปได้หารด้วยความเข้มข้นเริ่มต้นแล้วคูณด้วย 100 ผลที่ได้แสดงในตารางที่ 3

จากตารางที่ 3 ทำให้ทราบว่าหอดูดซับที่บรรจุขึ้นขยงนี้สามารถดูดซับสารละลายอินทรีย์ปนเปื้อนทั้ง โทลูอินและเอ็ม-ไซลีนได้เป็นอย่างดี และสามารถดูดซับพี-ครีซอลได้ในระดับที่น่าพอใจ ในขณะที่ดูดซับฟินอลได้น้อยมาก เนื่องจากฟินอลเป็นสารมีขั้วค่อนข้างมากนั่นเอง

4. สรุปผลการวิจัย

ยางธรรมชาติเป็นสารไม่มีขั้วจึงสามารถดูดซับสารอินทรีย์ที่ไม่มีขั้วที่ปนเปื้อนในน้ำได้ดีกว่าสารมีขั้ว ขยงจึงดูดซับโทลูอินและเอ็ม-ไซลีนได้ดีกว่าพี-ครีซอลและฟินอลซึ่งถูกดูดซับได้น้อยมาก โดยธรรมชาติแล้ว โครงสร้างของขยงที่มีสารตัวเติมแบบเสริมแรงจะเคลื่อนไหวได้น้อย การเติมด้วยหินปูนอาจช่วยดูดซับ โทลูอินและเอ็ม-ไซลีนได้บ้าง ในขณะที่ขยงมาด้าจะทำให้ดูดซับได้น้อยกว่าเล็กน้อย อย่างไรก็ตามการดูดซับสารปนเปื้อนที่มีระดับความเข้มข้นน้อย เช่นนี้ พบว่าเห็นความแตกต่างในกรณีของ โทลูอินเพียงชนิดเดียวเท่านั้น ส่วนสารชนิดอื่นไม่เห็นความแตกต่างของความ

สามารถในการดูดซับของขยงที่เติมสารตัวเติมอย่างชัดเจนเมื่อเปรียบเทียบกับขยงที่ไม่ได้ใช้สารตัวเติม แต่หากนำขยงขยงไปใช้อย่างต่อเนื่องจนกระทั่งอิ่มตัว น่าจะเห็นผลของสารตัวเติมชัดเจนยิ่งขึ้น ในการทดลองการดูดซับทั้งแบบกะแบบและแบบหอดูดซับพบว่าขยงสามารถดูดสารอินทรีย์ที่ไม่มีขั้วออกจากน้ำได้ดีกว่าสารที่มีขั้ว

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย ฝ่ายอุตสาหกรรม ภายใต้โครงการขยงพาราขนาดเล็ก (SPR)

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Powers S, Grimberg S. Experiments to Illustrate Phase Partitioning and Transport of Environmental Contaminants. *J. Chemical Engineering Education*. 1998; 40-45.
- [2] Kershaw D, Pamukcu S. Use of ground tire rubber in reactive permeable barriers to mitigate BTEX compounds. *ASTM Special Technical Publication*. 1997; 1275, 314-329.
- [3] Kershaw D, Pamukcu S. Ground rubber: Reactive permeable barrier sorption media. *Geotechnical Special Publication*. 1997; 71, 26-40.
- [4] Kim J, Park J, Edil T. Sorption of organic compounds in the aqueous phase onto tire rubber. *Journal of Environmental Engineering*. 1997; 123 (9), 827-834.
- [5] Kershaw D, Kulik B, Pamukcu S. Ground rubber: sorption media for ground water containing benzene and O-xylene. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering - ASCE*. 1997;123 (4), 324-334.
- [6] Meng X, Hua Z, Dermatas D, Wang W, Kuo H. Immobilization of mercury (II) in contaminated soil with used tire rubber. *Journal of Hazardous Materials*. 1998; 57 (1), 231-241.
- [7] Gunasekara A, Donovan J, Xing B. Ground discarded tires remove naphthalene, toluene, and mercury from water. *Chemosphere*. 2000; 41, 1155-1160.
- [8] Smith C, Anderson W, Freewood R. Evaluation of

- shredded tyre chips as sorption media for passive treatment walls. *Engineering Geology*. 2001; 60, 235-261.
- [9] Danwanichakul P, Jaroenkarn S, Jumpathi P, Dechojarassri D. Sorption and desorption of toluene, m-xylene, p-cresol and water by natural rubber chips. *Songklanakarin Journal of Science and Technology*. 2006; 28 (5), 1071-1082.
- [10] Igwe I, Ezeani O. Studies on the transport of aromatic solvents through filled natural rubber. *International Journal of Polymer Science*. 2012; no 212507.
- [11] Sareena C, Ramesan M, Purushothaman E. Transport studies of peanut shell powder reinforced natural rubber composites in aromatic solvents. *Polymer Composites*. 2012; 33 (10) , 1678-1692.
- [12] Mathew A, Packirisamy S, Stephan R, Thomas S. Transport of aromatic solvents through natural rubber/polystyrene (NR/PS) interpenetrating polymer network membranes. *Journal of Membrane Science*. 2002; 201 (1-2), 213-227.
- [13] Mathai A, Singh R, Thomas S. Transport of substituted benzenes through nitrile rubber/natural rubber blend membranes. *Journal of Membrane Science*. 2002; 202 (1-2) 35-54.